OPTIMIZACIÓN DE RUTAS EN 'CAMINO SEGURO AL COLE'. CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE RUTAS SEGURAS

ROCÍO COLINA TORRES

GRADO EN INGENIERÍA MATEMÁTICA, FACULTAD DE CIENCIAS MATEMÁTICAS,
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

Trabajo Fin grado

Junio 2013

Directoras: Inés Mª Gómez Chacón y Victoria López

Autorización de Difusión

ROCÍO COLINA TORRES

Junio 2013

El/la abajo firmante, matriculado/a en el Grado en Ingeniería Matemática de Facultad de Ciencias Matemáticas, autoriza a la Universidad Complutense de Madrid (UCM) a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a su autor el presente Trabajo Fin de Grado: “Optimización de rutas en Camino Seguro al Cole. Construcción y evaluación de rutas seguras”, realizado durante el curso académico 2012-2013 bajo la dirección de Inés Mª Gómez Chacón y Victoria López en el Departamento de Algebra, y a la Biblioteca de la UCM a depositarlo en el Archivo Institucional E-Prints Complutense con el objeto de incrementar la difusión, uso e impacto del trabajo en Internet y garantizar su preservación y acceso a largo plazo.

Resumen en castellano

En esta memoria se presenta un estudio sobre la determinación de rutas seguras a pie en los colegios de Madrid desde las casas de los alumnos hasta su centro de estudio. La motivación de este estudio surge a partir del proyecto educativo del Ayuntamiento de Madrid "Camino Seguro al Cole" (http://www.madrid.es/), proyecto que se inició en el año 2007, con el objetivo de favorecer y facilitar la autonomía e independencia de los niños de cuarto, quinto y sexto de primaria, y mejorar la seguridad ciudadana en el entorno de los colegios, en que la Universidad Complutense de Madrid está colaborando desde Cátedra Miguel de Guzmán de la Facultad de Ciencias Matemáticas y la Facultad de Informática.

Este trabajo pretende elaborar un mapa de movilidad a pie, donde se fija la ubicación del colegio y una valoración en función de varios parámetros de seguridad. En este mapa se identificarán los caminos óptimos en cuanto a dicha valoración, consiguiendo de este modo marcar las rutas más aconsejables. Estos parámetros de seguridad dependerán de la percepción de los alumnos y padres, lo que conllevará la recogida de nuevos datos en un colegio concreto de la Comunidad de Madrid, una modelización del problema y una comparación con la araña de movilidad generada por el Ayuntamiento.

Se han realizado distintos tipos de tratamiento de datos: Análisis implicativo jerarquizados a través de Clasification Hiéraschique et Cohesitive (CHIC), y la utilización coordenadas baricéntricas para obtener una ponderación de seguridad de cada calle. Con estas ponderaciones se trabaja sobre el problema de camino mínimo en función del riesgo con el algoritmo de Dijkstra a fin de conseguir estas nuevas arañas de movilidad.

Palabras clave

Camino Seguro, Problemas de Rutas, Optimización de Rutas, Camino mínimo, Seguridad, Autonomía, Cohesive and Hierarchical Implicative Classification (CHIC).

Resumen en inglés

This paper presents some research on identifying safe pedestrian routes in Madrid from students' homes to their schools. It is motivated by the educational project 'Safe trip to school', developed by Madrid's City Council (http://www.madrid.es/). It started in 2007 with the aim to help and improve 4th, 5th and 6th year primary school students' ability to walk to school independently and to increase safety in school areas. The Universidad Complutense de Madrid is linked to this project through the Faculty of Mathematics and Faculty of ComputerScience, via the Catedra UCM Miguel de Guzman.

Throughout the paper, a pedestrian mobility map is created, in which the school is located and a rating is made using several safety parameters. Using this map, optimal routes are chosen using the previous rating process, finding the most reasonable ways to get to the desired point. The mentioned parameters will depend on parents and students' perception, which will yield to: survey data collection at a specific school, mathematical modelization, and a comparison to the City Council's previous mobility map.

Different mathematical techniques will be used: Cohesive and Hierarchical Implicative Classification (CHIC) and barycentric coordinates to obtain a safety rating for each street. Then we will use these ratings to work on a Shortest Path Problem using Dijkstra's algorithm, providing new mobility maps.

Keywords

Safe route, Route problems, Route optimization, Shortest Path Problem, Safety, Autonomy, Cohesive and Hierarchical Implicative Classification (CHIC).

Índice de contenidos

Agradecimientos

Gracias a cada una de las personas que hicieron de estos cuatro años de carrera una bonita etapa de mi vida. Pero sobre todo, gracias a mi familia, que nunca dudó de mí y siempre me ayudó a levantarme después de las caídas.

Agradezco a los diferentes equipos de profesionales e investigadores de los proyectos: Proyecto Madrid a pie, Camino seguro Ayuntamiento, Grupo G-Tec de la UCM y la Cátedra UCM Miguel de Guzmán de la Facultad de Ciencias Matemáticas, por la oportunidad de participación y los impulsos recibidos para mi formación.

1. Introducción: Situación del problema y antecedentes

El proyecto educativo del Ayuntamiento de Madrid “Camino Seguro al Cole” se inicia en el año 2007. La motivación en este proyecto se basa en el deseo de desarrollar la autonomía de los niños y niñas de cuarto, quinto y sexto de primaria en su camino diario desde casa hasta el colegio.

Los tres principios que han guiado tanto las actuaciones del proyecto ‘Camino Seguro al Cole’ del Ayuntamiento como esta memoria son los siguientes:

- Los escolares tienen capacidad para proponer mejoras en el barrio y en la ciudad en la que viven.
- Lo que es bueno para la infancia es bueno para toda la población.
- En la medida en que los ciudadanos recuperan el espacio público para la convivencia, la ciudad resulta más humana, segura y sostenible. Esto cobra aún más fuerza con los pequeños, para los que pasar tiempo en la calle con otros niños y niñas es fundamental para su crecimiento físico y psíquico.

Basándose en estos principios, el Ayuntamiento de Madrid genera unas arañas de movilidad en función del número de alumnos que transitan por cada calle, de manera que la seguridad de un camino se mide en función del número de individuos que transitan por él.

La manera de generar estas arañas no incluía hasta el momento el uso de ningún algoritmo matemático que facilitase los cálculos y obtuviera una araña de movilidad directamente. Así, trabajando como se ha hecho hasta ahora sobre este proyecto, se debía generar una araña distinta para cada año, ya que en cada curso académico tiene alumnos nuevos y domicilios en otras posiciones. Este proceso de generar arañas a mano directamente sin el uso de una herramienta informática ni de algoritmos matemáticos es muy lento.

Por este motivo el presente trabajo tiene como objetivo la generación de estas arañas de movilidad utilizando otros métodos de manera que sea fácil generarlas una vez programados los correspondientes algoritmos e introducidos los destinos a los que debemos llegar desde el colegio.

Por ejemplo, para el colegio Nuestra Señora de la Paloma, el Ayuntamiento de Madrid generó araña de movilidad que se muestra en la Figura 1.1.

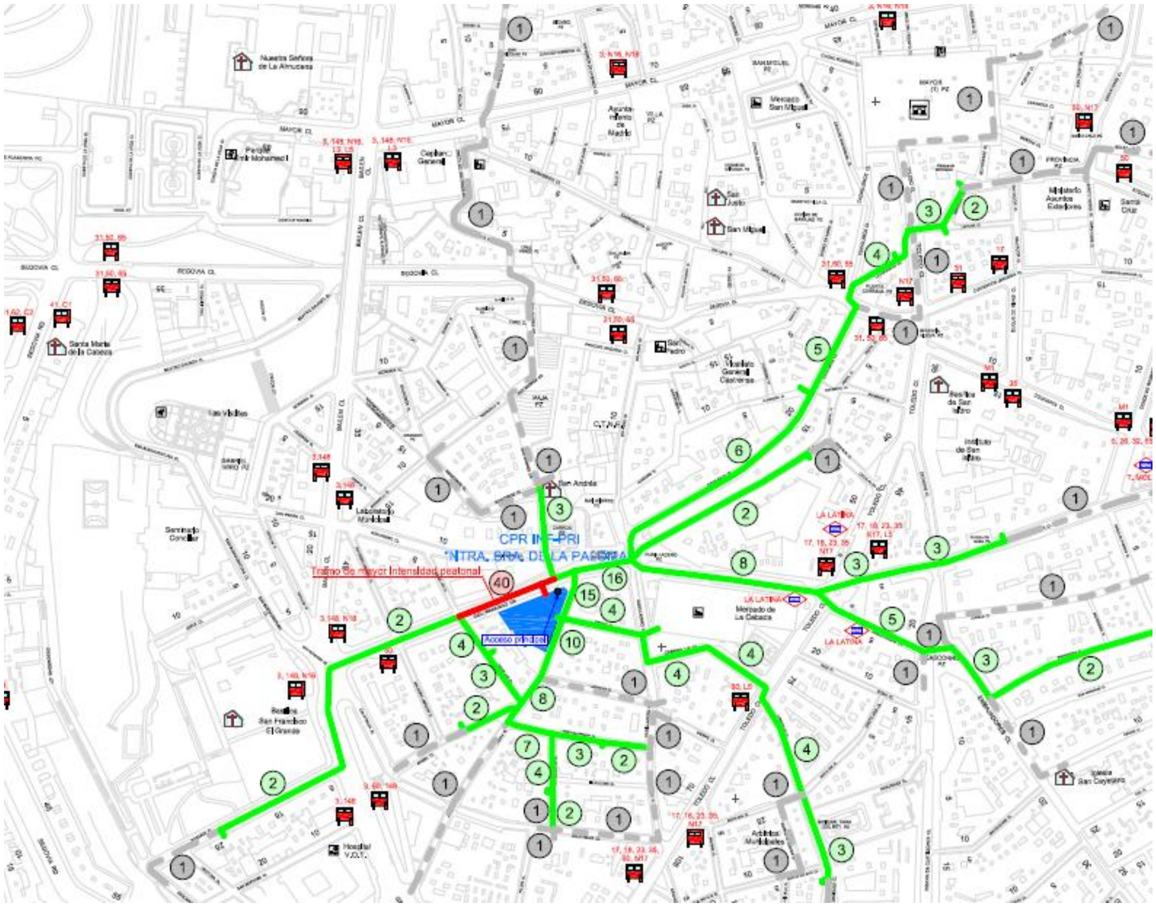

Figura 1.1: Araña de movilidad del Colegio Nuestra Señora de la Paloma

En esta imagen, los tramos marcados en verde indican los caminos que se consideran más seguros, y los rojos aquellos con mayor intensidad peatonal. Los números que acompañan a cada calle representan el número de alumnos que transitan por ésta.

Las distintas arañas que se han generado de este tipo en distintos colegios de la Comunidad de Madrid se han basado únicamente la ubicación de las casas de los niños para encontrar cuales eran las rutas más favorables en el sentido de que las rutas coincidiesen lo más posible para que no hubiera alumnos que contaran con un recorrido en el que no se encontrase a compañeros.

Además, en las arañas que ya han sido generadas, la seguridad depende única y exclusivamente del número de alumnos que transitan por cada calle, pero ¿este factor es decisivo a la hora de decidir si una ruta es segura o no? ¿Qué entendemos realmente por seguridad? Estas son las preguntas que han motivado este estudio.

En este trabajo se pretende dar una visión diferente de la seguridad, teniendo en cuenta otros factores. Podemos tener en cuenta la propia opinión y percepción de los alumnos y de sus padres. Haciendo esto se obtiene una distinta percepción de la seguridad o riesgo de las distintas calles de la zona cercana al colegio en cuestión.

Así, los objetivos principales de este trabajo son fomentar la autonomía y la independencia de los más pequeños, mejorar la movilidad potenciando el hecho de ir a pie, tener en cuenta las aportaciones de los niños y de sus padres, y encontrar un modo de generar las arañas de los distintos colegios de una manera más rápida e informatizada.

En esta memoria, se generan unas nuevas arañas de movilidad, a partir de la percepción de seguridad que tengan los mismos alumnos del colegio y sus padres. Para ello debemos, en primer lugar, reunir nuevos datos para tener una ponderación de la seguridad de cada calle. Además, una vez recogidos estos datos debemos realizar un análisis estadístico de los mismos y establecer relaciones importantes por zonas, calles, etcétera. Una vez hecho esto, debemos generar una nueva araña de movilidad en función de estos datos, lo que se realizará utilizando el algoritmo de Dijkstra para conseguir el camino de mínimo riesgo.

Para la realización de este trabajo se ha contado con la ayuda del Ayuntamiento de Madrid para analizar propuestas y decidir hacia donde guiar el estudio de la seguridad, y con la ayuda de alumnos y padres para disponer de nuevos datos con los que trabajar y generar estas nuevas arañas de movilidad.

Además, este trabajo pretende ser una base sólida que dé lugar a la ampliación en número de colegios y en formas de identificar parámetros que permitan medir la seguridad de las rutas en el proyecto del Ayuntamiento de Madrid. Consideramos que todo lo hecho en este trabajo debería servir para cualquier colegio que se quiera estudiar, es decir, los algoritmos generados y programas propuestos deben tener validez en todos los casos.

Paralelo a este trabajo existe otro en el que se han conseguido arañas de movilidad teniendo en cuenta los tramos que se pueden hacer en otros medios de transporte como autobús o metro, para aquellos alumnos cuyas casas se encuentren más lejos.

Complementario a este trabajo otra estudiante, Beatriz Municio de la Facultad de Ciencias Matemáticas presenta como trabajo de grado “Optimización de rutas en Camino Seguro al Cole. Construcción de rutas con medios de transporte alternativos”. La elaboración de arañas de movilidad teniendo en cuenta los tramos que se pueden hacer en otros medios de transporte como autobús o metro, para aquellos alumnos cuyas casas se encuentren más lejos.

Estos dos trabajos consideramos dan soporte matemático a los desarrollado por alumnos de la Facultad de Informática, cuyo objetivo es crear una aplicación móvil de apoyo a las familias para que los padres ayuden a sus hijos a aprender autonomía en la ciudad.

Tanto los algoritmos como los programas utilizados en esta memoria serán de gran utilidad para ambas tipologías de proyectos, de modo que se podrán utilizar para los medios de transporte alternativos y para la recogida de datos y obtención de arañas de movilidad en la aplicación móvil.

En los siguientes capítulos se desarrollan las distintas etapas por las que hay que pasar para conseguir las arañas de movilidad finales. El segundo capítulo trata de la recogida de datos y su tratamiento mediante dos análisis distintos. En tercer capítulo se construye el modelo matemático usando el algoritmo de Dijkstra y se realiza una comparativa de arañas. Por último, en el cuarto capítulo, se exponen las conclusiones.

2. Recogida y tratamiento de datos

La recogida de datos se llevó a cabo en el colegio Nuestra Señora de la Paloma de Madrid. Estos datos nos servirán de soporte para modelizar, obtener resultados y realizar una comparativa con la araña de movilidad obtenida y la generada por el Ayuntamiento de Madrid.

Nuestro objetivo es obtener información complementaria tanto desde el punto de vista del informante como del concepto de percepción de seguridad del individuo. Por lo tanto, se plantea una encuesta al alumnado de 5º y 6º de primaria (64 sujetos en total) y a los padres (18 sujetos en total) con el fin de estudiar la percepción de seguridad de cada calle que tienen tanto los niños como sus padres.

El instrumento de encuesta consiste en un mapa del entorno del colegio (Figura 2.1). Se pidió a los escolares que asignasen mediante colores un valor de seguridad a cada calle que conociesen, siendo verde la asignación más segura, azul una asignación de la seguridad intermedia, y rojo la menos segura.

De esta manera se ha conseguido, mediante la asignación de etiquetas lingüísticas, la medición de variables cuantitativas. Estas etiquetas nos ayudan a caracterizar fenómenos complejos de definir, como en nuestro caso, la seguridad, lo que propicia que un valor de la variable pueda estar sujeto a diversos factores, por lo que estaremos trabajando con una incertidumbre incluida en las mismas variables utilizadas.

Un ejemplo del mapa entregado por un alumno del colegio en cuestión se muestra en la Figura 2.1.

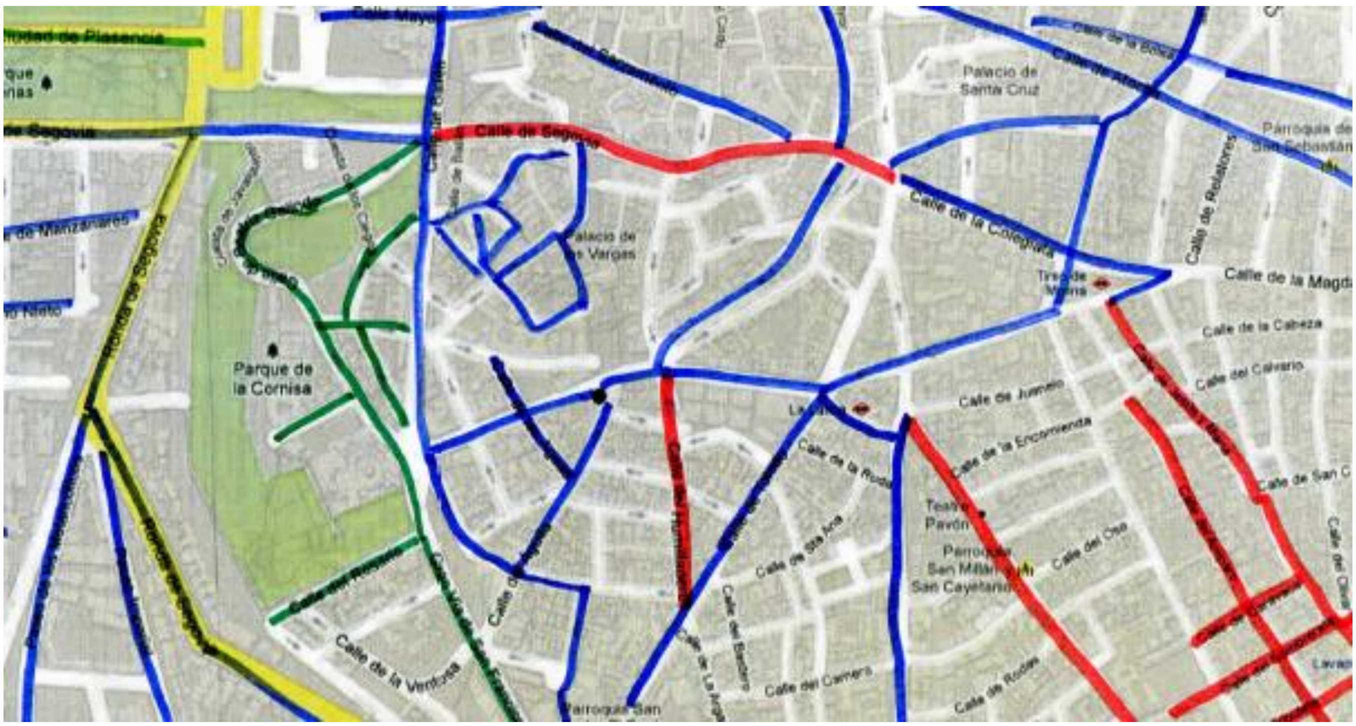

Figura 2.1. Ejemplo de mapa coloreado por un escolar

Una vez recopiladas las encuestas se procedió a su digitalización en un fichero Excel.

Para ello en primer lugar se asigna un número a cada calle, para lo que se trabaja con el mapa de la zona que se muestra en la Figura 2.2.

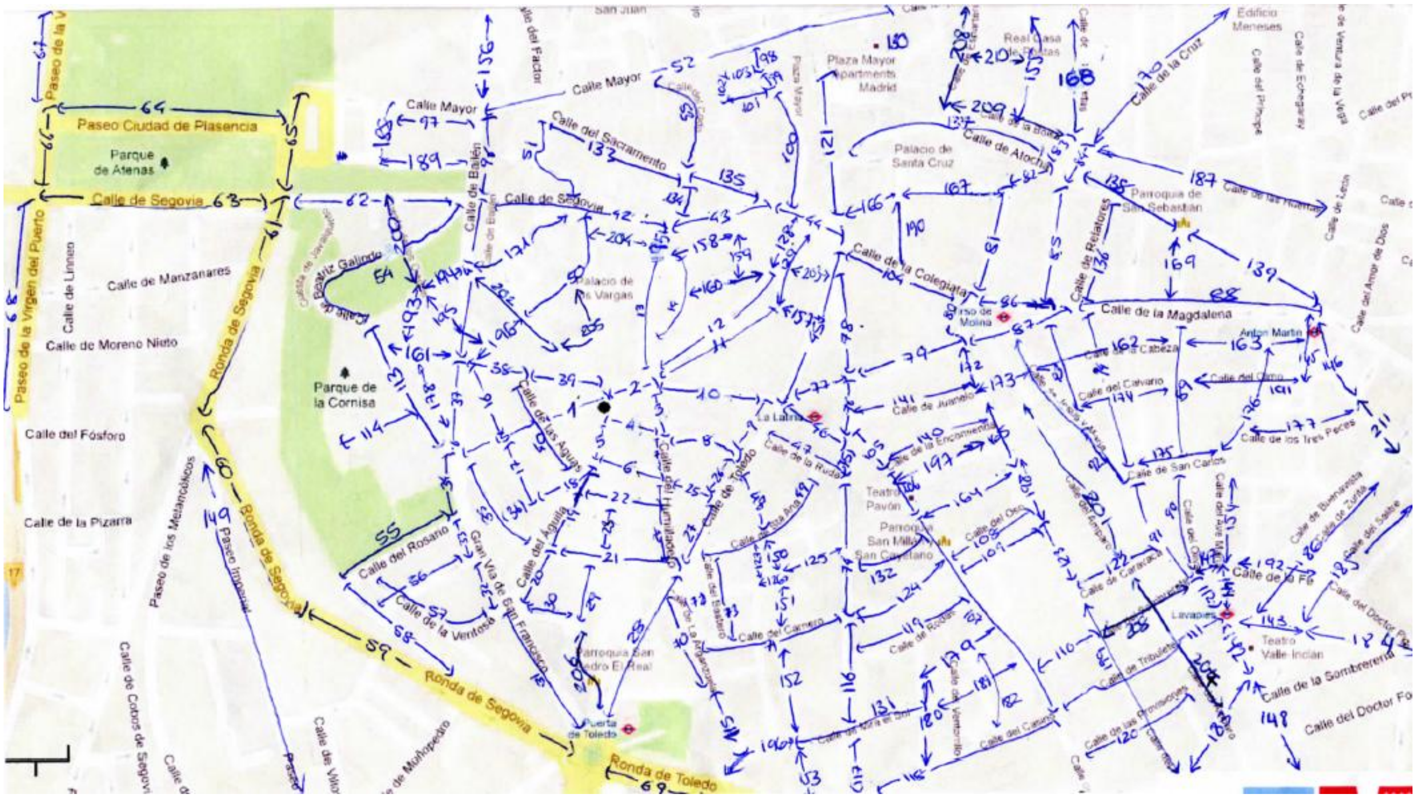

Figura 2.2: Mapa de calles numeradas

Además, a cada sujeto se le asignó también un número. De este modo, generamos una matriz $(A)_{i,j}$ donde:

$$(A)_{i,j} = \begin{cases} v, & \textit{si el sujeto i ha identificado la calle j como muy segura} \\ a, & \textit{si el sujeto i ha identificado la calle j como segura} \\ r, & \textit{si el sujeto i ha identificado la calle j como poco segura} \end{cases}$$

Con estos datos se pretende dar una ponderación a cada calle que refleje la seguridad de la misma. Esta asignación de datos claramente plantea un problema de incertidumbre.

Al haber construido la matriz del modo explicado, corremos el riesgo de contar con una gran cantidad de filas que contienen muy pocas valoraciones. Para balancear estos elementos, se tiene en cuenta el número de sujetos que no han valorado cada una de las calles, ya que de lo contrario, estaríamos valorando del mismo modo una calle que un solo alumno valora como ‘no segura’ y el resto de alumnos y padres no se decantan por ninguna valoración, y una calle que todos los alumnos y padres hayan valorado como ‘no segura’.

Para manejar este problema de incertidumbre se debe obtener una valoración ponderada única que tenga en cuenta esta falta de respuesta por parte de los encuestados de forma que se completen los datos faltantes. Además, como se ha dicho, la medición de las variables cualitativas está hecha mediante la asignación de etiquetas lingüísticas, las cuales llevan un grado de incertidumbre intrínseco que podemos tratar mediante el uso de lógica difusa.

Encontramos dos soluciones factibles para tratar la ausencia de información. A continuación se describe cada una de ellas.

2.1. Análisis implicativo y jerárquico.

Se efectúa un análisis implicativo (Gras et al, 1997) para explorar la estructura de la percepción de seguridad en las distintas calles. Este análisis estadístico permite establecer reglas de asociación en un conjunto de datos cruzando variables e individuos marcando las tendencias de conjuntos de propiedades usando una medida de carácter no lineal de tipo inferencial. Se trata de estadística no simétrica utilizando la idea de implicación del álgebra booleana y la inteligencia artificial. El conocimiento se forma inductivamente a partir de que se encuentra un número de éxitos que aseguran un cierto nivel de confianza en cierta regla. En el momento en que se alcanza ese nivel (subjetivo), la regla se acepta y se pone en práctica.

Se busca identificar hechos y reglas que están interrelacionadas y que forman progresivas estructuras de seguridad. Este es justamente el objetivo del presente trabajo, encontrar reglas que permitan disminuir el número de categorías en las preguntas de una encuesta sobre el camino seguro que, al mismo tiempo, proporcionen información sobre los aspectos que están interviniendo en la estructura de la percepción de seguridad. Siguiendo a Grass hay tres importantes reglas que se pueden describir: 1) a → b, donde a y b pueden ser categorías y reglas; 2) a → (b → c); y 3) (a → b) → (c → d). Estas reglas describen una estructura que es jerárquica, orientada y no simétrica.

Esta estructura se puede obtener mediante el programa Clasification Hiéraschique et Cohesitive (CHIC) ((Bodin, Coutourier, & Gras, 2000). Este programa produce tres tipos de diagramas que ofrece diferente información: a) Árbol de similitudes: aglutina grupos de variables en función de su homogeneidad lo que da pie a la interpretación de las agrupaciones con que se manejan las variables, produciéndose en cada nivel del gráfico una agrupación de similaridad en orden decreciente. b) El árbol jerárquico: permite interpretar en términos de semejanza clases de variables constituidas significativamente a ciertos niveles, identificando reglas y niveles de cohesión entre las variables o clases. c) Gráfico implicativo: su construcción utiliza tanto el índice de intensidad y un índice de validez. Muestra las asociaciones implicativas que son significativas a niveles específicos.

En nuestro caso haremos uso de este programa para realizar un análisis de los datos a partir de la asignación de las calles como variables principales, e indicando si quien realiza la encuesta es un alumno (y el curso al que pertenece) o un padre mediante variables suplementarias.

Normalmente CHIC trabaja con variables binarias. Pero en nuestro caso tenemos cuatro valores diferentes que representan el haber considerado una calle muy segura, segura, insegura, o no haberse decantado por ningún índice de seguridad de la misma. Así, tendremos que particionar el intervalo [0,1] en cuatro fragmento y trabajar con variables modales. El análisis expuesto a continuación es el obtenido aplicando el valor 0 al clasificar una calle en rojo, 0.33 sin haberla clasificado, 0.66 clasificándola en azul, y 1 en verde.

Vamos a conseguir un grafo implicativo. Para ello, cuando CHIC trabaja con variables binarias, utiliza un índice de implicación. Al trabajar con variables modales tendremos un índice de propensión que no es equivalente al anterior.

Consideramos dos variables A e B, con valores en el intervalo [0,1], y denotamos por A_i e B_i los valores de estas variables observados en el sujeto i, dentro de una población P de tamaño n.

Decimos que hay una propensión de A sobre B si encontramos un bajo número de sujetos con un valor alto en A y un valor bajo en B. Consideramos la media en P de $A_i(1-B_i)$ como un índice de “no propensión” de A sobre B. Concluimos que existe una propensión de X sobre Y en P si esta media es significativamente baja.

Dada una variable A (respectivamente B) de media m_A (resp. M_B) y de varianza v_A (resp. V_B), se define el coeficiente de propensión de A sobre B como:

$$\bar{q}(a,b) = \frac{\frac{\sum_{i\in P} a_i(1-b_i)}{n} - m_a(1-m_b)}{\sqrt{\frac{(v_a+m_a)^2(v_b+(1-m_b)^2)}{n}}}$$

Y la intensidad de propensión de A sobre B: $\Phi\left(-\bar{q}(a,b)\right)$, siendo Φ la función de distribución de una N(0,1).

Para la lectura de las propensiones, se propone su representación mediante un grafo orientado, donde los nodos son las variables, y existirá un arco entre dos variables a y b si la intensidad de propensión de a sobre b es mayor que un valor prefijado 1-ε (con ε<0,5). Podemos definir la relación de propensión entre a y b como:

$$\Phi\left(-\bar{q}(a,b)\right) \geq 1 - \varepsilon$$
$$\Phi\left(-\bar{q}(a,b)\right) \geq \Phi\left(-\bar{q}(b,a)\right)$$

En nuestra matriz de datos podemos considerar para cada calle el factor de varianza, que nos indica la semejanza entre el índice de implicación y el de propensión con el que trabajaremos. Cuando este valor del factor de varianza es superior a 2 hay una diferencia significativa entre ambos índices. Con nuestros datos, al tener una gran cantidad de calles en las que el número de sujetos que las ha valorado es bajo, tenemos calles con factores de varianza demasiado elevados. (ver Apéndice A)

La mayoría de las calles con un factor de varianza alto son aquellas que se encuentran fuera de la zona cercana al colegio, de modo que para trabajar con variables (calles) con factores de varianza de valor pequeño haremos un análisis estadístico de los datos de la zona que se encuentra más cerca del colegio.

Trabajando con estos datos en un primer lugar podemos plantearnos que relaciones existen entre las distintas calles, teniendo en cuenta tanto la valoración de los alumnos como de los padres, con CHIC obtenemos el grafo implicativo que muestra la Figura 2.3., donde cada número representa la calle asignada en la matriz de datos, y las flechas representan la relación de implicación que tienen unas calles y otras a un nivel de confianza del 99% (en rojo), 95% (en azul), 90% (en verde) y 85% (en gris).

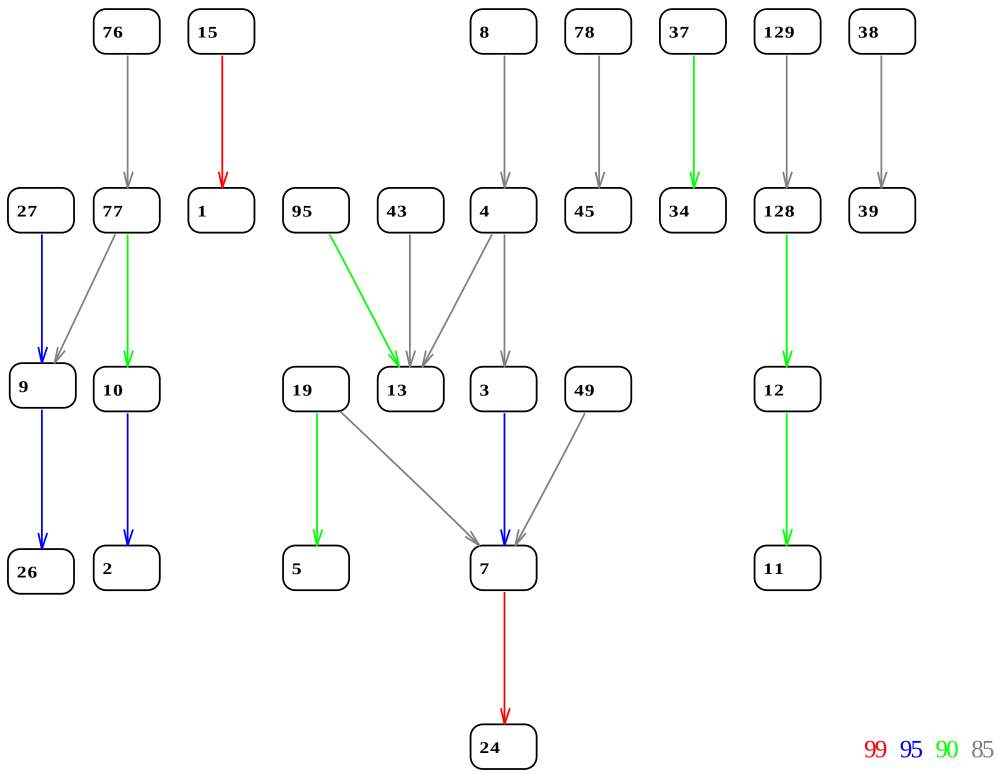

Figura 2.3: Grafo implicativo

El análisis del grafo implicativo nos ofrece no sólo una representación visual si no que estudiando estas implicaciones podemos hacer un análisis más profundo en el que explorar que calles se relacionan con otras directamente y que influencia tienen en esta implicación las valoraciones de los padres y de los alumnos por separado. Además podremos distinguir por zonas, u obtener conjuntos de calles con valoraciones equivalentes y analizar los resultados.

2.1.1. Árbol de similitudes:

El siguiente paso es realizar un estudio jerárquico de similaridades, en el que se identifica la calidad de las agrupaciones en función de los niveles dependiendo de la longitud de las ramas, de manera que la similaridad es más fuerte cuanto menor es dicho nivel y vemos la contribución por individuos.

La Figura 2.4 es el árbol de similaridad de los datos con los que trabajamos mediante la matriz en la que los datos, como hemos explicado, han sido ponderados en el rango [0,1].

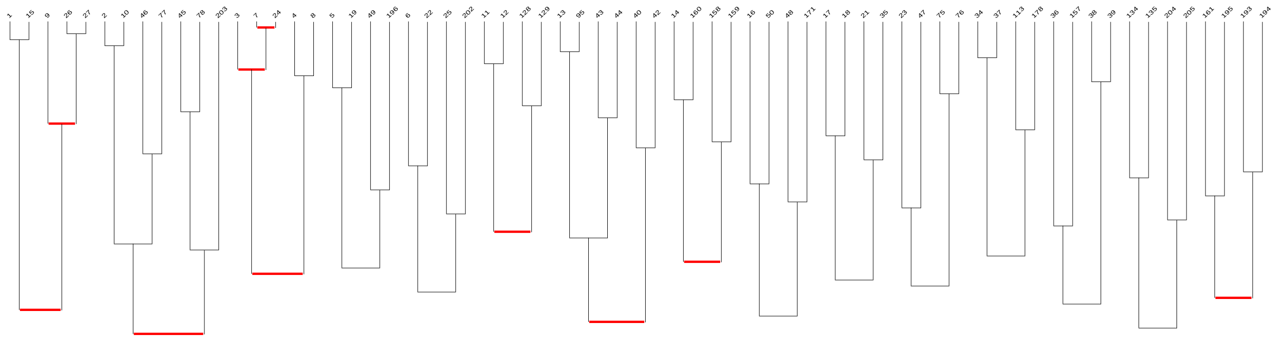

Figura 2.4: Árbol de similitudes

Este árbol nos permite ver cuáles son los niveles significativos de los que constituyen el árbol. Estos serán los niveles en los que se esté más de acuerdo entre los sujetos la ponderación positiva de dos calles o dos conjuntos de ellas. Por lo tanto estos serán los niveles significativos destacados en rojo en la construcción de la jerarquía.

En total tenemos 67 calles para realizar este estudio. Este grafo nos da 52 relaciones entre nodos, es decir, entre calles, de las cuales vamos a estudiar las significativas:

-En el nivel 1, tenemos la relación (7 24) con una similaridad de 0.951926. La variable que contribuye más a esta clase son los alumnos de 5º de primaria con un riesgo de 0.0142.

-En el nivel 8 tenemos la relación (3 (7 24)) con una similaridad de 0.812741. La variable que contribuye más a esta clase son los alumnos de 5º de primaria con un riesgo de 0.176.

-En el nivel 17 tenemos la relación (9 (26 27)) con una similaridad de 0.74407. La variable que contribuye más a esta clase son los padres de alumnos con un riesgo de 0.414.

-En el nivel 35 tenemos la relación ((11 12) (128 129)) con una similaridad de 0.433185. La variable que contribuye más a esta clase son los alumnos de 6º de primaria con un riesgo de 0.138.

-En el nivel 40 tenemos la relación ((14 160) (158 159)) con una similaridad de 0.252482. La variable que contribuye más a esta clase son los padres de alumnos con un riesgo de 0.204.

-En el nivel 42 tenemos la relación ((3 (7 24)) (4 8)) con una similaridad de 0.229385. La variable que contribuye más a esta clase son los padres de alumnos con un riesgo de 0.127.

-En el nivel 46 tenemos la relación ((161 195) (193 194)) con una similaridad de 0.149306. La variable que contribuye más a esta clase son los padres de alumnos con un riesgo de 0.0649.

-En el nivel 48 tenemos la relación ((1 15) (9 (26 27))) con una similaridad de 0.133971. La variable que contribuye más a esta clase son los padres de alumnos con un riesgo de 0.286.

-En el nivel 50 tenemos la relación (((13 95) (43 44)) (40 42)) con una similaridad de 0.113769. La variable que contribuye más a esta clase son los alumnos de 5º de primaria con un riesgo de 0.0581.

-En el nivel 52 tenemos la relación (((2 10) (46 77)) ((45 78) 203)) con una similaridad de 0.018344. La variable que contribuye más a esta clase son los alumnos de 6º de primaria con un riesgo de 0.334.

Aunque son interesantes todas las significatividades, para un estudio más profundo nos centramos en aquellas relaciones obtenidas con una similaridad mayor o igual a 0.5. Así, de las 10 relaciones anteriores, nos centraremos en las tres primeras, correspondientes a los niveles 1,8 y 17 del árbol de similaridad.

Para estudiar los niveles de similaridad veamos las diferentes tipologías de relación lógica expresadas. Hacemos notar que en la notación de la salida de resultados generada por el software CHIC la relación que establece entre calles utiliza paréntesis (a b) donde a y b son números que representan en nuestro caso una calle. Esto significa que los sujetos que calificaron a como calle segura, también lo hicieron con b. Así, cuando tenemos (a (b c)) debemos interpretar que los sujetos que calificaron a y b como calles seguras, también lo hicieron con c.

A nivel 1, teníamos la relación (7 24), lo que se traduce en que los sujetos que calificaron la calle 7 como calle segura, también lo hicieron con la calle 24. En la Figura 2.5 se ha dibujado sobre el mapa de la zona a estudiar con un color más oscuro aquellas calles que implican las otras, es decir, en nuestro caso, la calle 7 estará indicada con un color más oscuro que la 24.

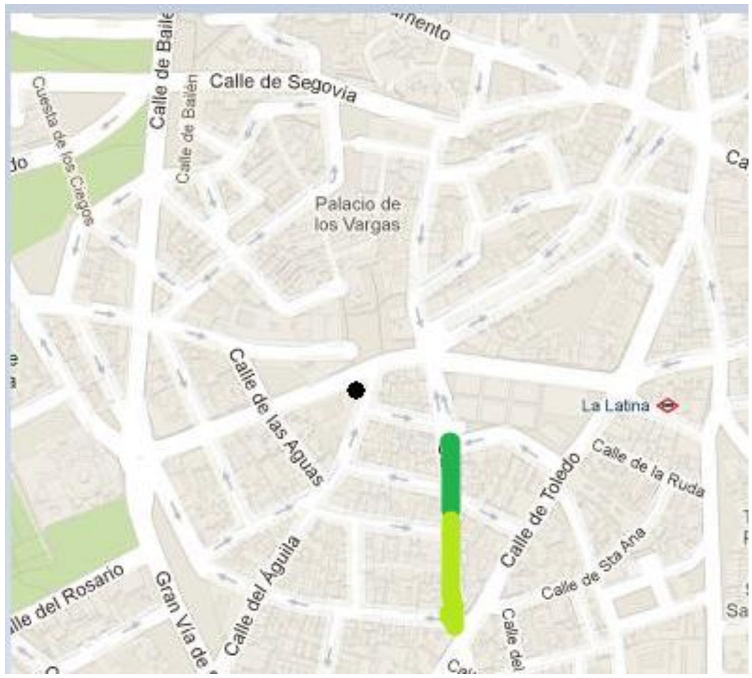

Figura 2.5: Relación de calles a nivel 1

Al nivel 8 nos encontramos con la relación (3 (7 24)), que como vemos, incluye las calles del anterior nivel significativo (ver Figura 2.6)

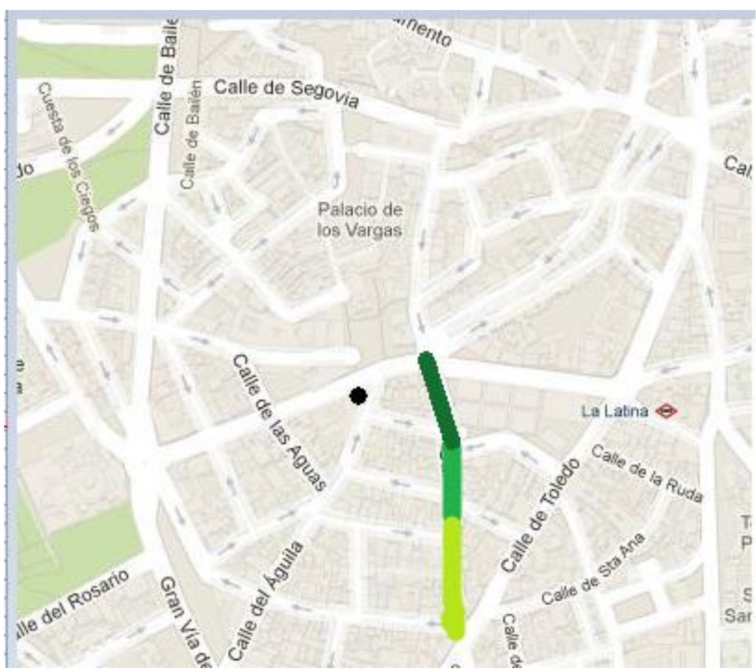

Figura 2.6: Relación de calles a nivel 8

El nivel 17, también con un grado de similaridad alto, nos proporciona la relación (9 (26 27)), que ya no incluye calles utilizadas en los otros dos niveles estudiados, pero coincide con ellos en que las calles relacionadas son distintos tramos de la misma calle (ver Figura 2.7).

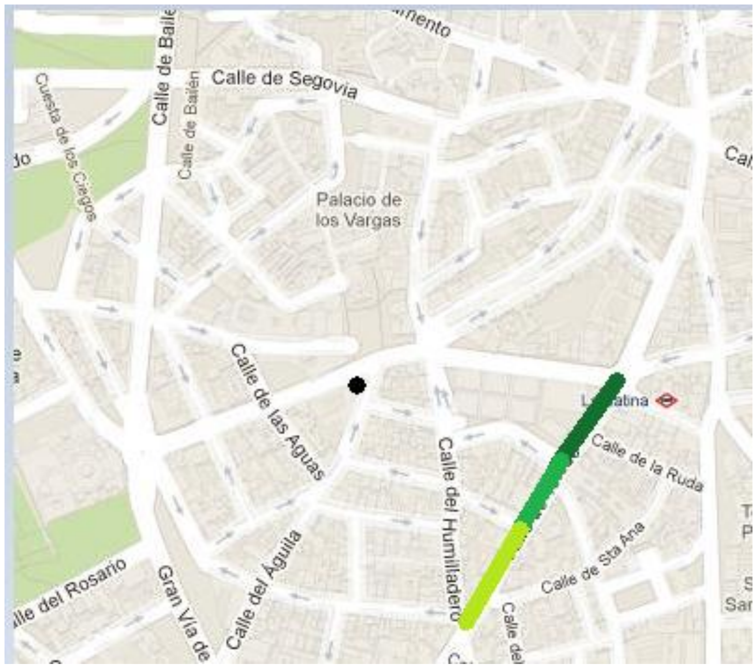

Figura 2.7: Relación de calles a nivel 17

2.1.2. Árbol cohesitivo:

A continuación estudiamos el árbol cohesitivo proporcionado con CHIC al trabajar con nuestra matriz de datos. Se genera este árbol partiendo de la idea de que una regla entre clases de variables sólo toma verdaderamente su sentido bajo la condición de que dentro de cada clase de variables exista una cierta cohesión entre las variables que la constituyen; esto debe hacerse respetando el orden instituido en la clase. Se desea así que el flujo implicativo de una clase A sobre una clase B esté alimentado por un flujo interno en A y alimente a un flujo interno en B.

Para ello CHIC efectúa los cálculos de los índices de cohesión implicativos entre las variables y resulta el árbol que muestra la Figura 2.8.

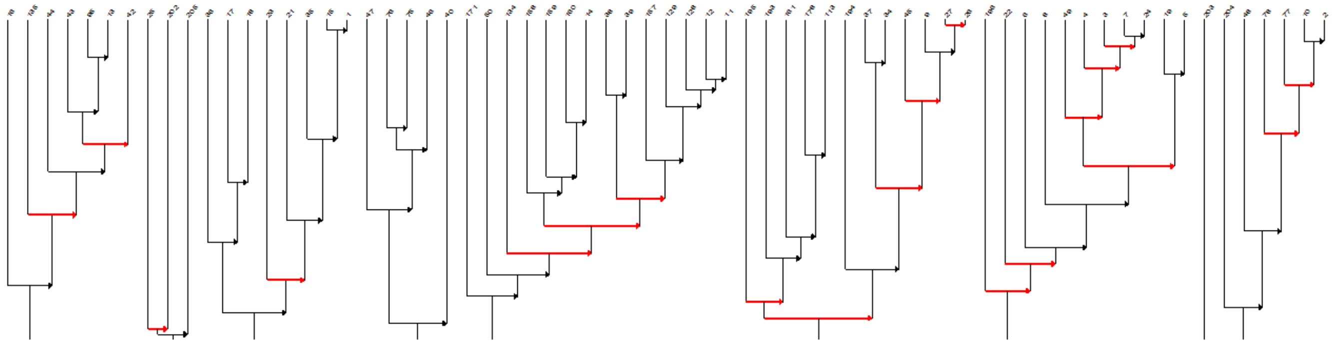

Figura 2.8: Árbol de cohesión

Al igual que en el árbol jerárquico, este árbol nos muestra las relaciones significativas en los distintos niveles marcando dichas implicaciones en rojo sobre las calles (o conjuntos de calles) relacionadas. Obtenemos 58 relaciones entre nodos de las cuales las significativas son las expuestas en la Tabla 2.1.

Podemos analizar estos resultados obtenidos. Es posible que en algunos casos obtengamos zonas de seguridad en función de la vivienda de los encuestados, o que las zonas que globalmente se consideran más seguras sean aquellas cercanas a algún supermercado, o establecimiento que frecuenten los alumnos con sus respectivos padres/madres, asociando de este modo un grado de seguridad mayor que a zonas menos conocidas o menos transitadas por ellos con regularidad.

Además, se cuenta con la información de que variable (padres y madres, alumnos de quinto, o alumnos de sexto) es la que más contribuye a cada relación entre calles obtenida, lo cual permite sacar conclusiones de la distinta percepción de seguridad por calles y zonas en función de un grupo de sujetos u otro.

Gracias a este análisis obtenemos una serie de reglas que pueden ser utilizadas por el Ayuntamiento, tanto para orientar la realización de nuevas encuestas y la manera de hacerlo, como para establecer zonas de seguridad.

Tabla 2.1: Relaciones significativas

Nivel	Relación	Cohesión	Variable que más contribuye	Riesgo
1	(27 26)	0.999	Padres	0.347
5	(3 (7 24))	0.989	Alumnos 5º	0.0238
9	(4 (3 (7 24)))	0.905	Alumnos 5º	0.0266
12	(77 (10 2))	0.879	Alumnos 6º	0.514
15	(45 (9 (27 26)))	0.841	Alumnos 5º	0.403
18	(49 (4 (3 (7 24))))	0.794	Alumnos 5º	0.0494
21	(78 (77 (10 2)))	0.778	Alumnos 5º	0.458
23	((43 (95 13)) 42)	0.765	Alumnos 5º	0.0844
27	((49 (4 (3 (7 24)))) (19 5))	0.728	Alumnos 5º	0.728
31	((37 34) (45 (9 (27 26))))	0.673	Padres	0.466
33	((38 39) (157 (129 (128 (12 11)))))	0.649	Alumnos 6º	0.41
36	(135 (44 ((43 (95 13)) 42)))	0.591	Alumnos 5º	0.138
38	158 (159 (160 14))) ((38 39) (157 (129 (128 (12 11))))))	0.552	Alumnos 6º	0.262
43	(134 ((158 (159 (160 14))) ((38 39) (157 (129 (128 (12 11)))))))	0.51	Padres	0.204
45	(22 (6 (8 ((49 (4 (3 (7 24)))) (19 5)))))	0.479	Alumnos 5º	0.123
48	(23 (21 (35 (15 1))))	0.431	Padres	0.149
50	(196 (22 (6 (8 ((49 (4 (3 (7 24)))) (19 5))))))	0.416	Alumnos 5º	0.123
52	195 (193 (161 (178 113))))	0.371	Padres	0.129
55	((195 (193 (161 (178 113)))) (194 ((37 34) (45 (9 (27 26))))))	0.315	Padres	0.32
57	(25 202)	0.187	Padres	0.19

2.2. Tetraedro

Como se ha comentado antes, estamos ante un problema con un alto grado de incertidumbre. De algún modo debemos valorar la cantidad de sujetos que valoran una calle con respecto al total. Sin tener en cuenta este factor podríamos optar por trabajar con un triángulo. Esto es, trabajaríamos con tres puntos en un plano de manera que estos formasen un triangulo equilátero, en el cual cada vértice representaría un color (rojo, azul y verde) de tal manera que para cada calle, dependiendo de sus valoraciones en verde, azul y rojo, se obtiene un punto dentro de dicho triangulo, lo que conlleva una ponderación de seguridad de la calle en función de la proximidad a los vértices de la figura.

Trabajando con el triángulo, la ponderación obtenida para una calle con una sola valoración es exactamente igual que la obtenida para una calle que todos los sujetos han valorado con el mismo nivel de seguridad. Así, debemos contar con el número de sujetos que, para cada calle, no evalúan la seguridad, ya sea por desconocimiento de la seguridad de la misma, o por cualquier otra causa.

Para tener en cuenta este dato basta con añadir un nuevo punto a la figura del triangulo de modo que diste de todos sus vértices igual, y que esta medida coincida con lo que distan entre ellos, generando de este modo un tetraedro en el espacio.

Trabajando así obtendremos una ponderación final de la seguridad para cada calle que tendremos en cuenta en los procedimientos posteriores. Pasamos a explicarlo con más detalle:

En primer lugar, debemos contabilizar los datos que hemos recogido para cada calle, de tal modo que para cada una de ellas contamos con cuatro mediciones: el número de sujetos que valoran la calle en rojo, el número de sujetos que lo hacen en azul, el que lo hacen en verde, y el número de sujetos que no asigna ningún valor. Partiendo de estas cuatro mediciones, se busca obtener una valoración única, para que no ocurra lo dicho anteriormente como que se dé un valor final igual a una calle que esté valorada por 5 personas como ‘poco segura’, y el resto no contestado, que otra calle valorada por todos como ‘poco segura’.

Lo que se persigue es en realidad es la ubicación de esa valoración en un rango entre seguro e inseguro en función de los cuatro valores de los que partimos. Esto se corresponde con buscar la ubicación de un punto dentro de dicho tetraedro regular en el que cada vértice se corresponde con cada una de las cuatro posibles valoraciones. La ubicación de este punto estará determinada por los pesos que se le asigne a cada uno de los vértices del tetraedro. Después se proyecta el punto sobre la base formada por los vértices correspondientes a ‘verde’, ’azul’ y ‘rojo’, donde ya se está en situación de hacer una ponderación final que refleje la seguridad de esa calle en relación a la proximidad o lejanía que presente el punto proyectado con los vértices de la base.

Así, para modelizarlo matemáticamente, por cada calle se construye un tetraedro con vértices (1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1), que representan las tres valoraciones posibles de la seguridad (verde, azul y rojo) respectivamente, y (1, 1, 1), que representa el número de encuestados que no han asignado valoración, y consideramos el punto “respuestas” dado por las coordenadas (V, A, R, NC), siendo v el número de encuestados que valoraron esta calle en verde, a el número de encuestados que lo hicieron en azul, r el número de los que lo hicieron en rojo y nc el número de no contestados. Para poder hacer una valoración ponderada, se debe representar dicho punto dentro del tetraedro, proyectarlo sobre la base y, una vez proyectado, hacer la ponderación.

Para representar el punto dentro del tetraedro, se considera la siguiente teoría:

Sea un tetraedro dado por los puntos:

$$A=(x_A,y_A,z_A),\ \mathrm{B}=(x_B,y_B,z_B),\ \mathrm{C}=(x_C,y_C,z_C),\ \mathrm{D}=(x_D,y_D,z_D).$$

Un punto $P=(x,y,z)$ del tetraedro se puede expresar como:

$$P=(t_A,t_B,t_C,t_D) \text{ con } t_A+t_B+t_C+t_D=1 \text{ y } 0\le t_i\le 1\ \forall i=A,B,C,D.$$

La relación entre las coordenadas cartesianas y las baricéntricas del tetraedro (la cual vamos a aplicar) es:

$$\begin{cases} x=t_Ax_A+t_Bx_B+t_Cx_C+t_Dx_D \\ y=t_Ay_A+t_By_B+t_Cy_C+t_Dy_D \\ z=t_Az_A+t_Bz_B+t_Cz_C+t_Dz_D \end{cases}$$

Quedando las coordenadas del punto ‘respuesta’:

$$\begin{cases} x=v\cdot 1+a\cdot 0+r\cdot 0+nc\cdot 1\ =v+nc \\ y=v\cdot 0+a\cdot 1+r\cdot 0+nc\cdot 1\ =a+nc \\ z=v\cdot 0+a\cdot 0+r\cdot 1+nc\cdot 1\ =r+nc \end{cases}$$

Siendo $v=V/81;\ \mathrm{a}=A/81;\ \mathrm{r}=R/81;\ \mathrm{nc}=NC/81$, para que se verifique la condición necesaria $v+a+r+nc=1$.

Una vez obtenidas las coordenadas cartesianas del punto ‘respuesta’, se proyecta dicho punto sobre la base formada por los vértices que representan las tres valoraciones. Para ello basta calcular la recta perpendicular a la base que pasa por el punto respuesta y la intersección entre dicha recta y la base, para obtener el punto proyectado $P=(x',y',z')$.

Los cálculos quedan modelizados del siguiente modo:

Para proyectar el punto (x,y,z) sobre el plano dado por los puntos $(1,0,0),(0,1,0),(0,0,1)$ se cuenta con que la ecuación implícita de este plano es $x+y+z-1=0$, y un vector normal a él es $(1,1,1)$.

La recta que une el punto proyectado que buscamos con el original viene dada por la expresión

$$\begin{cases} x-x'=y-y' \\ x-x'=z-z' \end{cases}$$

El punto buscado es la intersección entre el plano y esta recta, por tanto, se calcula resolviendo el sistema

$$\begin{cases} x-x'=y-y' \\ x-x'=z-z' \\ x'+y'+z'-1=0 \end{cases}$$

Finalmente, se obtiene el punto proyectado $P=\left(x',y',z'\right)$, donde

$$\begin{cases} x'=\dfrac{2x-y-z+1}{3} \\ y'=x'-x+y \\ z'=x'-x+z \end{cases}$$

Una vez proyectado se considera la valoración final siguiente:

$$n_F=0\cdot p_R+0.5\cdot p_A+1\cdot p_V$$

con $p_j=\dfrac{\left(1/d_j\right)}{\left(1/d_V+1/d_A+1/d_R\right)}$ $\forall j=V,A,R$; donde d_j representa la distancia del punto proyectado al vértice de la base correspondiente al color verde, azul, o rojo, respectivamente.

De este modo, n_F es la valoración final que asignamos a cada calle.

Para generar estos nuevos datos de seguridad asociados a cada calle, de nuevo, se trabaja con un archivo Excel, en el que se encuentran tantas filas como calles a estudiar y tres columnas correspondientes al número de valoraciones en verde, azul y rojo respectivamente. De esta manera, mediante funciones de Excel, se consigue el resultado final, asignando a cada calle una valoración final de seguridad ponderada en el intervalo (0,1).

Aun así nos damos cuenta de que los resultados obtenidos al trabajar con nuestros datos, están muy centralizados, con lo que aparentemente no hay ninguna calle muy segura, ni muy insegura. Para poder evaluar mejor los resultados y ver mayor distinción entre los valores de las distintas calles, asignamos mediante una función lineal un nuevo valor a cada calle del siguiente modo:

Sea a el valor más pequeño de las ponderaciones finales obtenidas, y b el mayor valor de estas. Dado un x en el intervalo (a,b), le asignamos el valor (x-a)/(b-a).

De este modo, el valor a ahora será el 0, el b será 1, y las demás ponderaciones finales obtenidas estarán en el intervalo (0,1). Así, hemos expandido nuestro intervalo de manera que ahora recorremos el intervalo incluyendo sus extremos.

Podemos además distinguir la procedencia de los datos con los que se trabaja, de manera que se puedan visualizar los resultados de todos los sujetos, sólo los de los padres, o solo los de los alumnos de 5º o 6º. Para ello generamos un Excel en el que contamos con cuatro pestañas distintas, una con todos los datos recogidos, otra con las valoraciones de los alumnos de 5º curso, otra con los de 6º, y por ultimo una en la que se tengan en cuenta solo la valoración de los padres. Así, el único cambio que hay que introducir entre una pestaña y otra será el número entre el que dividir e n función del número de sujetos estudiados; obteniendo así cuatro ponderaciones finales de cada calle de la seguridad.

La Figura 2.9 muestra el Excel de los resultados obtenidos para las primeras calles teniendo en cuenta la valoración de los 81 sujetos, obteniendo la valoración final mediante el método del tetraedro explicado, y la expansión del intervalo al rango completo entre 0 y 1.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB
1	SUJETO_	verde	azul	rojo	nc	TOTAL	%V	%A	%R	%NC	%T	X	Y	Z	PR.X	PR.Y	PR.Z	DV	DA	DR	INV DV	INV DA	INV DR	PESOV	PESOA	PESOR	NOTA FINAL	Ponderacion
2	1	27	15	4	35	81	0,333	0,19	0,049	0,432	1	0,77	0,62	0,48	0,48	0,33	0,19	0,65	0,85	0,99	1,54498	1,1824	1,0066	0,4138	0,3167	0,2696	0,57208498	0,80311238
3	2	33	13	3	32	81	0,407	0,16	0,037	0,395	1	0,8	0,56	0,43	0,54	0,29	0,17	0,57	0,91	1,03	1,7507	1,1042	0,9681	0,4579	0,2888	0,2532	0,60235407	1
4	3	14	11	7	49	81	0,173	0,14	0,086	0,605	1	0,78	0,74	0,69	0,37	0,34	0,29	0,77	0,81	0,87	1,30397	1,2289	1,1464	0,3544	0,334	0,3116	0,52141943	0,47355429
5	4	8	3	11	59	81	0,099	0,04	0,136	0,728	1	0,83	0,77	0,86	0,34	0,28	0,38	0,81	0,88	0,76	1,23543	1,1333	1,3118	0,3357	0,3079	0,3564	0,48962384	0,26673737
6	5	22	12	3	44	81	0,272	0,15	0,037	0,543	1	0,81	0,69	0,58	0,45	0,33	0,22	0,67	0,84	0,96	1,48165	1,1932	1,0399	0,3989	0,3212	0,2799	0,55945325	0,72094828
7	6	4	6	2	69	81	0,049	0,07	0,025	0,852	1	0,9	0,93	0,88	0,33	0,36	0,31	0,82	0,79	0,85	1,22363	1,2715	1,1808	0,3329	0,3459	0,3212	0,50583166	0,37216243
8	7	20	11	7	43	81	0,247	0,14	0,086	0,531	1	0,78	0,67	0,62	0,42	0,31	0,26	0,71	0,85	0,91	1,41547	1,1774	1,1042	0,3829	0,3185	0,2987	0,54208976	0,60800606
9	8	4	3	5	69	81	0,049	0,04	0,062	0,852	1	0,9	0,89	0,91	0,33	0,32	0,35	0,82	0,83	0,8	1,22446	1,2024	1,2478	0,3332	0,3272	0,3396	0,49682769	0,31359542
10	9	25	23	10	23	81	0,309	0,28	0,123	0,284	1	0,59	0,57	0,41	0,4	0,38	0,22	0,74	0,77	0,96	1,35213	1,2949	1,0441	0,3663	0,3508	0,2829	0,54172784	0,60565195
11	10	30	13	5	33	81	0,37	0,16	0,062	0,407	1	0,78	0,57	0,47	0,51	0,3	0,2	0,61	0,89	0,99	1,64249	1,1248	1,0061	0,4353	0,2981	0,2666	0,58433044	0,88276388
12	11	11	7	1	62	81	0,136	0,09	0,012	0,765	1	0,9	0,85	0,78	0,39	0,34	0,27	0,75	0,81	0,9	1,33731	1,2329	1,1138	0,363	0,3347	0,3023	0,53033334	0,53153554
13	12	10	7	1	63	81	0,123	0,09	0,012	0,778	1	0,9	0,86	0,79	0,38	0,35	0,27	0,76	0,81	0,89	1,31956	1,2419	1,1205	0,3584	0,3373	0,3043	0,52703624	0,51008927
14	13	12	5	5	59	81	0,148	0,06	0,062	0,728	1	0,88	0,79	0,79	0,39	0,3	0,3	0,75	0,85	0,85	1,3406	1,171	1,171	0,364	0,318	0,318	0,52302618	0,48400556
15	14	6	6	0	69	81	0,074	0,07	0	0,852	1	0,93	0,93	0,85	0,36	0,36	0,28	0,79	0,79	0,88	1,26904	1,269	1,1403	0,345	0,345	0,31	0,51750211	0,44807378
16	15	24	13	4	40	81	0,296	0,16	0,049	0,494	1	0,79	0,65	0,54	0,46	0,33	0,21	0,66	0,84	0,97	1,50396	1,1837	1,0337	0,4041	0,3181	0,2778	0,56319018	0,74525546
17	16	1	1	2	77	81	0,012	0,01	0,025	0,951	1	0,96	0,96	0,98	0,33	0,33	0,34	0,82	0,82	0,81	1,21716	1,2172	1,2401	0,3313	0,3313	0,3375	0,49688494	0,31396781
18	17	4	2	2	73	81	0,049	0,02	0,025	0,901	1	0,95	0,93	0,93	0,35	0,33	0,33	0,8	0,83	0,83	1,25575	1,2095	1,2095	0,3417	0,3291	0,3291	0,50628763	0,3751283
19	18	4	4	1	72	81	0,049	0,05	0,012	0,889	1	0,94	0,94	0,9	0,35	0,35	0,31	0,8	0,8	0,85	1,24719	1,2472	1,181	0,3393	0,3393	0,3213	0,50900362	0,39279473
20	19	16	10	4	51	81	0,198	0,12	0,049	0,63	1	0,83	0,75	0,68	0,41	0,33	0,26	0,73	0,82	0,91	1,37426	1,2148	1,1004	0,3725	0,3293	0,2983	0,53710893	0,57560788
21	20	16	7	4	54	81	0,198	0,09	0,049	0,667	1	0,86	0,75	0,72	0,42	0,31	0,27	0,71	0,85	0,9	1,4062	1,1721	1,1166	0,3806	0,3172	0,3022	0,53918489	0,58911114
22	21	1	7	2	71	81	0,012	0,09	0,025	0,877	1	0,89	0,96	0,9	0,3	0,38	0,32	0,85	0,76	0,84	1,17248	1,3139	1,1929	0,3187	0,3571	0,3242	0,49722495	0,31617942
23	22	2	4	2	73	81	0,025	0,05	0,025	0,901	1	0,93	0,95	0,93	0,33	0,35	0,33	0,83	0,8	0,83	1,20954	1,2558	1,2095	0,3291	0,3417	0,3291	0,5	0,33422994
24	23	1	5	1	74	81	0,012	0,06	0,012	0,914	1	0,93	0,98	0,93	0,32	0,37	0,32	0,84	0,78	0,84	1,19419	1,2884	1,1942	0,3248	0,3504	0,3248	0,5	0,33422994
25	24	21	10	5	45	81	0,259	0,12	0,062	0,556	1	0,81	0,68	0,62	0,44	0,31	0,25	0,68	0,86	0,93	1,46668	1,1653	1,0784	0,3953	0,3141	0,2906	0,5523282	0,67460282

Hoja1 Hoja2 Hoja3 Hoja4

Figura 2.9: Excel con las ponderaciones de seguridad utilizando el método del tetraedro

Ahora que disponemos de una ponderación final entre 0 y 1 de la seguridad de cada calle, estamos en disposición de comparar dos calles cualesquiera.

Una buena manera de representar los resultados obtenidos mediante este cambio es dibujar sobre el mapa inicial la red de calles con el color correspondiente a su valor de seguridad. Para ser más rigurosos con las ponderaciones obtenidas, en lugar de representar en el mapa tan solo calles en color verde azul o rojo, hacemos una función en Matlab (ver Anexo B) que nos proporciona el color RGB correspondiente al valor de cada calle, de modo que obtenemos un mapa con una escala de colores en degradado entre verde y azul, y entre azul y rojo.

Para realizar este script se ha tenido en cuenta que en color RGB, el rojo se representa por [1,0,0], el azul por [0,0,1] y el verde por [0,1,0]. Pese a esto, trabajaremos con un azul más claro, el [0,0.5,1], para visualizar mejor los resultados y no quede el mapa final muy oscuro.

Así, las ponderaciones que se encuentren en el intervalo [0,0.5) se encontraran entre los colores rojo y azul, asignando a una ponderación 'x' el color [1-2x, x, 2x], y a las ponderaciones 'z' en el intervalo [0,5,1] se les asignará el color [0, z, 2-2z].

Para poder representar estos datos, la opción escogida ha sido trabajar con una matriz de adyacencia en la que las filas y las columnas representan los distintos nodos que se pueden ver en el mapa de la Figura 2.10.

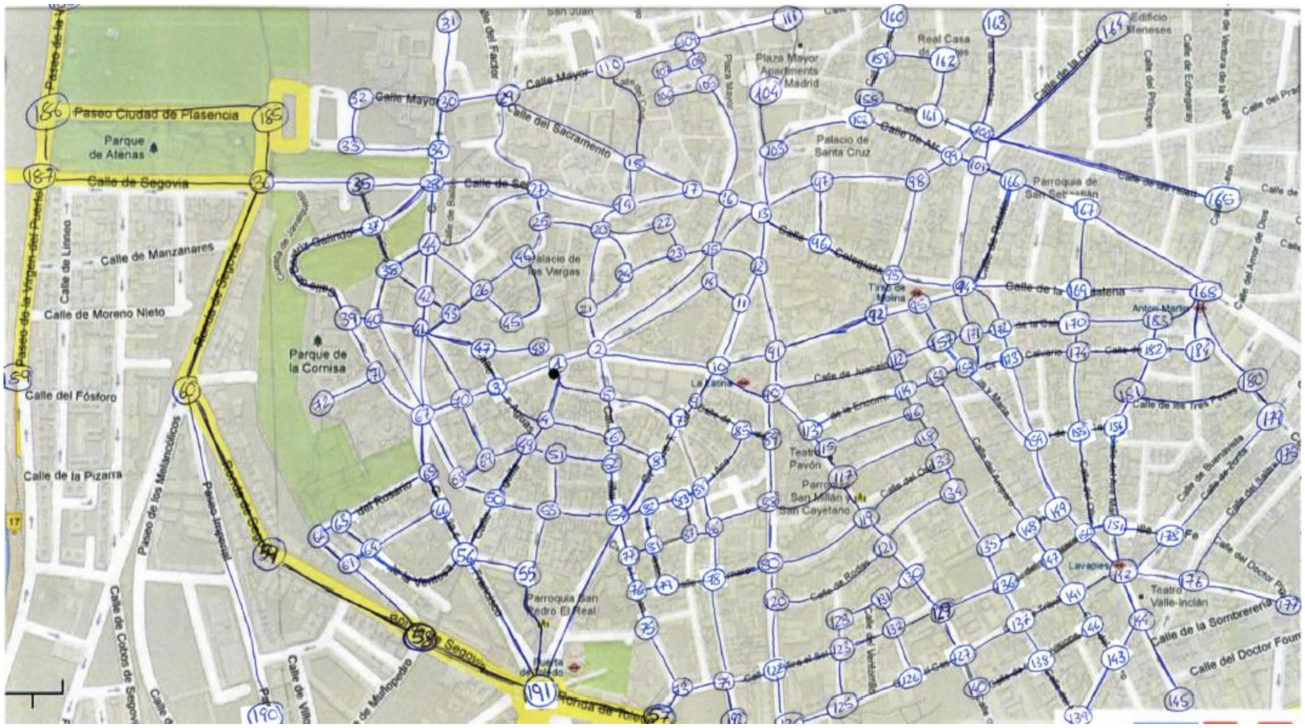

Figura 2.10: Mapa de nodos numerados

En esta matriz $(B)_{ij}$ tendremos que un elemento b_{ij} toma un valor infinito si no existe arista que una los nodos i, j, y tendremos el valor de la ponderación de seguridad obtenido con el método del tetraedro en otro caso.

Dicha matriz, en un archivo de Excel la podemos implementar en Matlab leyéndola, de modo que los valores ‘x’ y ‘z’ a los que hemos hecho referencia antes, ahora serán los elementos de la matriz de adyacencia; y aplicando el degradado dicho, los resultados (utilizando la ponderación obtenida con el tetraedro teniendo en cuenta los 81 sujetos) obtenidos se muestran en la Figura 2.11.

Figura 2.11: Resultados de seguridad de las calles utilizando el degradado

3. Construcción del modelo y comparación de arañas

Como se ha indicado en la introducción, el objetivo final es construir arañas que contengan los caminos más seguros en el entorno del colegio escogiendo distintos destinos. Para ello trabajamos con el grafo constituido por aristas que representan calles y vértices que representan las intersecciones entre estas. Dando como peso de las aristas la valoración de la seguridad, el problema consiste en maximizar esta seguridad, o lo que es lo mismo, minimizar el riesgo. Este riesgo, viene dado como: $1 - n_F$ en cada calle, donde n_F es la valoración de la seguridad obtenida mediante el método del tetraedro desarrollado anteriormente.

Por tanto, nuestro problema se ha convertido en un problema de camino mínimo. En el grafo sobre el que trabajamos contamos con ciclos y pesos positivos y consecuentemente se resolverá aplicando el algoritmo de Dijkstra.

A continuación nos centramos en la explicación de dicho algoritmo, su pseudocódigo y como se ha trabajado con él en nuestro problema en particular.

3.1. Algoritmo de Dijkstra

El algoritmo de Dijkstra (llamado también Shortest Path First (SPF)) es un algoritmo que determina el camino más corto desde un vértice inicial hasta todos los demás. Para ello se necesita que las aristas del grafo tengan pesos asignados, ya sean distancias o, como en nuestro caso, un nivel de riesgo. Es importante tener en cuenta para aplicar este algoritmo debemos estar ante un grafo conexo, simple y con pesos no negativos en las aristas.

La idea general de este algoritmo es ir explorando los caminos más cortos que empiezan en el nodo inicial, que en nuestro caso será el nodo en el que se encuentre el colegio, y que llegan al resto de nodos del grafo en cuestión. Cuando se obtiene el camino más corto desde el nodo origen al resto de vértices que forman el grafo, el algoritmo se detiene.

El funcionamiento del algoritmo es el siguiente: en primer lugar marcamos todos los vértices como no utilizados. El algoritmo parte de un vértice inicial que marcaremos como utilizado. A partir de ese vértice evaluamos sus adyacentes, y buscamos entre ellos el que esté más cerca de nuestro punto inicial. Lo tomamos como punto intermedio y vemos si podemos llegar más rápido a través de este vértice a los demás. Después de esto, actualizamos las distancias, escogemos al siguiente más cercano y repetimos el proceso. Cuando todos los nodos han sido explorados, se detiene el algoritmo.

El hecho de no poder trabajar con pesos negativos en las aristas se debe a que al elegir siempre el nodo más cercano pueden quedar nodos excluidos de la búsqueda que en las siguientes iteraciones bajarían el coste general del camino al pasar por una arista con peso negativo.

A continuación, el pseudocódigo del algoritmo de Dijkstra:

1. Input: Un grafo ponderado G = (V,E) , y el nodo inicial elegido $s \in V$. Definimos el peso de la arista (i,j) como w(i,j), siendo w(i,j) = ∞ si no hay arista entre estos vértices.
2. Creamos un conjunto de vértices T que contendrá los nodos que ya hayan sido explorados. De manera que comenzaremos con el conjunto vacío y el algoritmo parará cuando T = V. También tendremos que saber cuál es el predecesor de cada nodo para conseguir, al finalizar el algoritmo, un camino mínimo a cada uno de los vértices que componen el grafo. Así, t(z) será el nodo predecesor al nodo $z \in V$.
3. Inicialización: Sea T = {}, t(s)=d(s,s)=0, t(z)=w(s,z) para z distinto de s.

4. Iteración: Elegir el vértice u perteneciente a T con etiqueta mínima. Añadir u a T. Analizar cada arista (u,z) con z en T y actualizar la etiqueta de z a min{t(z), t(u)+w(uz)}. La iteración continua hasta que T=V(G) o hasta que t(z) = ∞ para cada vértice z de T.
5. En cualquier caso la etiqueta de cada vértice z en T será la distancia del nodo s al z. Los vértices que no están en T son aquellos que no son accesibles desde el nodo s.

Podemos implementar este algoritmo en Matlab utilizando las ponderaciones de seguridad obtenidas con el método del tetraedro. Para ello necesitaremos generar una función auxiliar, ya que el algoritmo de Dijkstra devuelve un output con la lista de predecesores de cada nodo que forma parte de la red. Esta función auxiliar tendrá como input una lista de predecesores y una lista de nodos destino y devuelve como output la matriz con los caminos mínimos, nodo por nodo, para cada destino indicado.

3.2. Comparación de arañas

Mediante el interfaz gráfico en Matlab podemos obtener unos resultados visuales mucho más satisfactorios. Buscamos la interacción del usuario, de manera que éste pueda elegir que peso da a las valoraciones de los alumnos de 5º, a los alumnos de 6º, y a los padres. Para ello añadiremos tres casillas en la pantalla que visualizará el usuario para que introduzca dichos pesos.

Además, tal y como está planteado el problema y como se han realizado los scripts anteriores con Matlab, la araña obtenida será generada en función de una serie de destinos (nodos) dados, por lo no nos bastará con generar una sola araña si no que el programa debe dar la opción de elegir distintas para llegar a diferentes destinos. Trabajando así, tendremos dos archivos generados (un .m y un .fig) que permiten al usuario interactuar eligiendo sus preferencias como se ha comentado (ver Anexo C).

Además, incluimos los botones ‘Iniciar’, que se pulsará al haber escogido los pesos en las distintas casillas y la araña que se desea obtener, y ‘Salir’ para abandonar el programa.

El resultado obtenido se muestra en la Figura 3.1.

Figura 3.1: Obtención de arañas con Matlab

Como se puede observar, además de dar ponderaciones distintas a las distintas valoraciones con las que se trabaja, se da la posibilidad de elegir entre la generación de distintas arañas (en función de la elección de unos destinos finales u otros) utilizando los pesos elegidos, o incluso de pintar todo el mapa para observar la seguridad de cada calle en función de un degradado que va de verde a rojo, pasando por azul, en función de la seguridad obtenida con dichos pesos.

4. Conclusión.

Los resultados presentados muestran la consecución de los objetivos planteados. Se ha logrado, mediante una modelización matemática dar respuestas a cuestiones planteadas en el proyecto de 'Camino Seguro al Cole', aportando una nueva forma de medir la percepción de la seguridad integrando las perspectivas del alumnado y de los padres.

Además, mediante el estudio jerarquizado de los datos se extraen conclusiones para distintas calles y zonas, lo que da pie a poder realizar las siguientes encuestas teniendo estos patrones que indican las calles que se encuentran interrelacionadas.

El trabajo de investigación ha sido un proyecto vivo al trabajar teniendo como base un proyecto de la Comunidad de Madrid, han ido surgiendo distintas propuestas y se han dinamizado nuevas ideas. Una de ellas era incluir como criterio para evaluar la seguridad de cada camino, el número de pasos de cebra que cruzarían los alumnos al transitar por éste. El problema para incluir dicho criterio es la modelización del problema, ya que tendríamos que optar por un grafo en el que cada calle no quedase indicada por una sola arista, si no por dos, de modo que una arista entre ellas que las uniese indicaría la existencia de un paso de cebra en el camino. Esto implica modificar las matrices utilizadas hasta el momento y que el tiempo en ejecutar el algoritmo fuese mayor.

Surgieron distintas dudas en cuanto a cómo representar los resultados obtenidos, que araña convendría más presentar a los alumnos para tomar el camino más óptimo en cada caso. De aquí surgió la idea de hacer un programa interactivo que permitiese a cada uno dar una ponderación y elegir entre distintas arañas.

Hay que tener en cuenta que para este estudio tan solo se ha contado con la percepción de seguridad de 81 sujetos entre padres/madres y alumnos. Pese a esto, los análisis jerarquizados expuestos nos proporcionan información significativa. Además, al introducir nuevos datos, tan solo tendríamos que modificar los distintos archivos Excel generados, ya que los programas creados en Matlab incorporarían estos nuevos datos directamente.

En cuanto a extrapolar esta situación a otros colegios de Madrid, es clara su posibilidad. Se realizaría el trabajo de recogida de datos, y se modelizaría el problema usando una notación clara y concisa, en la que se asigna un número a cada calle, y a cada vértice, y bastaría con esto para de nuevo poder utilizar los programas utilizados en este trabajo.

En efecto, estos programas pueden ser mejorados incluyendo nuevas medidas de seguridad o incluyendo aspectos como el nombrado de los pasos de cebra.

Esta memoria, junto con la paralela de rutas en medios de transporte alternativo, ha sido aceptada en el XXXIV Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa y las VIII jornadas de Estadística Pública (Castellón, 11-13 de Septiembre de 2013).

Referencias

Ayuntamiento de Madrid (ed.) (2012). *Madrid a pie, camino seguro al cole*. [En línea]. Consulta en 01/2013 en www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/AreasUrbanas_EducacionAmbiental/ContenidosBasicos/Publicaciones/MadridAPie/QueEsMadridAPie.pdf

Ayuntamiento de Madrid (ed.) (2012). Madrid *a pie, camino seguro al cole: Proyecto educativo.* [En línea]. Consulta en 01/2013 en www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/Agenda21/ContenidosBasicos/Publicaciones/MadridAPie/MadridAPieCaminoSeguroColeProyEduc.pdf

Bazaraa, Mokhtar S., Jarvis, John J., & Sherali, Hanif D. (1998). *Programación lineal y flujo de redes.* Editorial Limusa.

Bailleul, Marc (2001). *Des réseaux implicatifs pour mettre en évidence des représentations*. Math. & Sci. Hum. (39e année, n° 154-155, 2001, p. 31-46).

Colina, R.; Municio, B.; Gómez-Chacón, I. Mª y López, V. (2013) QMR: Modeling quality mobility routes under uncertainty, XXXIV Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa y las VIII jornadas de Estadística Pública (Castellón, 11-13 de Septiembre de 2013).

Gras, Régis & Kuntz, Pascale (2008). *An overview of the Statistical Implicative Analysis (SIA) development.* Laboratorio de Informática de Nantes.

Grimaldi, R.P. (1998). *Matemática discreta y combinatoria. Introducción y aplicaciones.* Rose-Hulman Institute of Technology.

Jungnickel, D. (2005). *Graphs, Networks and Algorithms*. Fourth Edition. London. Springer.

Mallo, P.E. (2005). *La medición de variables cualitativas en el balance scorecard. Un aporte de la lógica difusa*. Congreso Metropolitano. Ciencias Económicas. Buenos Aires.

Lagrange, J.B. (1998). *Analyse implicative d'un ensemble de variables numériques; application au traitement d'un questionnaire à responses modales ordonnées*, tome 46, 71-93.

Scala Estalella, J.J. (1988). *Análisis vectorial*, volumen 1, 317-328. Editorial Reverté.

Appendix A - Factores de varianza

El fichero Excel obtenido para estudiar los factores de varianza en cada calle se genera utilizando cada fila como la referente a un sujeto (e indicando si es padre o alumno y del curso que es), y representando en cada columna una calle diferente.

Así, es sencillo calcular por columnas la media y la varianza, y a partir de estos valores calcular el factor de varianza mediante una función sencilla de introducir en Excel.

El resultado en Excel es el que se muestra en las figuras A.1 y A.2

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH
57	n5-56	0,66	0,66	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,66	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	0,66	0,66	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33
58	n5-57	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	1,00
59	n5-58	1,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	1,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
60	n5-59	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	1,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
61	n5-60	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,33	1,00	0,33	0,66	1,00	0,33	0,33	1,00	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	0,66	0,66	0,66	0,33	0,33	0,00	0,33	0,33	0,33
62	n5-61	0,33	0,66	0,66	0,33	0,00	0,33	0,66	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,00	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
63	n5-62	0,33	1,00	0,33	0,33	1,00	0,33	1,00	0,33	0,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,66	0,66	0,66	1,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,33	0,33	0,00	0,33	0,33	1,00
64	n5-63	1,00	1,00	1,00	0,33	1,00	0,33	1,00	0,33	1,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	1,00	1,00	1,00	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	1,00
65	n5-64	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
66	p65	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
67	p66	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	0,00	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
68	p67	1,00	0,66	0,66	0,00	0,66	0,33	0,00	0,33	0,33	0,66	0,66	0,00	0,00	0,66	1,00	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,00	0,33	1,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
69	p68	0,66	0,66	0,66	0,00	0,66	0,66	0,66	0,00	0,66	0,66	0,66	0,66	0,00	1,00	0,66	0,00	0,00	0,66	0,00	0,66	0,66	0,66	0,66	0,33	0,66	0,66	0,33	0,66	0,00	0,33	0,33	0,66	0,00
70	p69	0,66	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,00	0,33	1,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,00	0,33	1,00	1,00	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
71	p70	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
72	p71	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
73	p72	1,00	1,00	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	1,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	0,66	0,66	0,66	0,66	0,00	0,66	0,00	1,00	1,00	1,00	0,66	0,66	0,33	0,33	0,33	0,66
74	p73	0,00	0,00	1,00	1,00	0,66	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,66	0,66	1,00	0,00	0,66	0,66	0,66	0,66	0,33	1,00	0,33	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,66	0,00	1,00	1,00	0,66
75	p74	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,66	0,66	1,00	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
76	p75	0,33	0,33	0,00	0,33	0,00	0,33	0,00	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,00	0,33	0,33	0,33	0,00	0,33	0,66	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
77	p76	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	1,00	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33
78	p77	0,00	0,00	1,00	1,00	0,66	0,33	1,00	1,00	0,33	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	0,66	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	0,66
79	p78	0,66	0,66	0,66	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	1,00	0,66	0,33	0,66	0,66	0,66	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
80	p79	0,33	0,33	0,66	0,33	1,00	0,33	0,66	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	0,66	0,66	0,66	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,66
81	p80	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,33	1,00	0,33	1,00	1,00	0,33	0,33	1,00	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	1,00	0,66	0,33	0,66	1,00	0,33	1,00	1,00	1,00	1,00	0,33	1,00	0,33	1,00	0,33
82	p81	0,66	0,33	0,00	0,33	0,66	0,33	0,00	0,33	0,66	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,66	0,66	0,33	0,33	0,00	0,33	0,66	0,66	1,00	0,66	0,33	0,66	0,33	0,33	0,66
83	Media	0,6	0,64	0,46	0,36	0,55	0,38	0,51	0,35	0,59	0,61	0,45	0,44	0,43	0,4	0,57	0,33	0,36	0,38	0,49	0,36	0,35	0,35	0,52	0,34	0,59	0,59	0,46	0,38	0,35	0,44	0,38	0,4	0,52
84	Varianza	0,1	0,11	0,09	0,06	0,1	0,03	0,1	0,03	0,12	0,11	0,06	0,06	0,07	0,04	0,1	0,01	0,03	0,03	0,08	0,02	0,02	0,01	0,1	0,02	0,1	0,1	0,08	0,03	0,02	0,07	0,04	0,04	0,09
85	Factor de Varianza	2,3	2,14	2,91	3,68	2,59	7,63	2,42	7	2,07	2,1	4,18	4,44	3,45	6,64	2,41	23	8,63	8,63	2,98	13,5	12,2	17,4	2,49	12,6	2,36	2,34	3,23	7,19	12,9	3,69	6,27	5,38	2,8

Figura A.1: Excel con los factores de varianza (primeras calles)

	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP
57	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
58	1,00	1,00	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,00	0,33	0,33	0,33	0,33
59	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
60	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
61	0,33	0,66	0,66	0,66	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	1,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
62	0,33	1,00	0,33	1,00	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,66	0,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
63	1,00	0,33	0,33	0,00	1,00	0,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,00	1,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
64	1,00	0,33	0,33	0,33	0,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
65	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33
67	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,66	0,66	0,33	0,33	0,00	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
68	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,66	0,00	0,33	0,33	0,33	0,66	0,00	0,00	0,00	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,00	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33
69	0,00	0,00	0,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,00	0,33	0,66	0,66	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,00	0,00	0,33	1,00	1,00
70	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
71	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
72	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
73	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
74	0,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	0,33	0,33	0,00	0,33	0,33	0,33	0,66	0,66	0,33	0,33	1,00	1,00	1,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,66	1,00	0,33	0,33	1,00
75	0,33	0,66	0,66	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
76	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,00	0,33	0,33	0,33	0,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
77	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
78	0,66	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	1,00	0,33	0,66	0,33	1,00	1,00	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
79	0,33	1,00	1,00	1,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	1,00	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
80	0,66	1,00	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
81	0,33	1,00	0,33	0,33	1,00	1,00	0,33	1,00	1,00	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,33	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,33	0,33	1,00	0,33
82	0,66	0,00	0,00	0,00	0,66	0,66	0,33	0,33	0,33	0,66	0,66	0,33	0,66	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	0,66	1,00	1,00	1,00	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33	0,66
83	0,52	0,42	0,37	0,39	0,47	0,52	0,4	0,35	0,36	0,35	0,41	0,41	0,5	0,39	0,39	0,41	0,42	0,42	0,34	0,37	0,37	0,36	0,38	0,39	0,36	0,34	0,37	0,34	0,34	0,33	0,33	0,35	0,34	0,35	0,35
84	0,09	0,08	0,04	0,05	0,09	0,09	0,06	0,01	0,04	0,02	0,05	0,06	0,09	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,01	0,03	0,03	0,02	0,03	0,04	0,02	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
85	2,8	3,02	5,45	4,8	2,72	2,89	4,31	16,6	5,98	11,1	4,45	4,07	2,79	5,08	4,78	4,45	5,39	6,25	16,1	7,56	8,34	9,61	8,58	6,54	10	23,6	8,3	18,1	18,1	32	17,9	16,6	40,4	20,7	18,7

Figura A.2: Excel con los factores de varianza (últimas calles)

Para obtener resultados visuales, se ha indicando en tono rojo aquellas casillas correspondientes a las calles en las que hayamos obtenido un valor del factor de varianza muy alto, amarillo para los intermedios y verde, en los mejores casos, para aquellos factores de varianza menores. Esperando obtener la mayor cantidad de casillas verdes posibles, y la menor de rojas.

Como se ve, la mayoría de las calles con números elevados (que corresponden a las calles más alejadas del colegio) obtienen en su mayoría un factor de varianza elevado, por lo que se toma la decisión de trabajar con el software CHIC sólo con las calles cercanas al colegio, para así obtener resultados más fiables.

Appendix B - Visualización de los resultados del tetraedro usando degradado en Matlab

Conocemos que en color RGB, el rojo se representa por [1, 0, 0], el azul por [0, 0, 1] y el verde por [0, 1, 0]. Trabajaremos con un color azul más claro para visualizar mejor los resultados y no quede el mapa final muy oscuro, para ello tendremos el color [0, 0.5, 1].

El script de Matlab con el que se obtienen los resultados es el siguiente:

```
%PINTAR MAPA SEGUN LOS VALORES OBTENIDOS CON EL TETRAEDRO

function tetraedro()

%abrimos la imagen
imagen= im2double(imread('E:\TFG\leer_puntos\mapa.png'));
imshow(imagen);
mapa = imresize(imagen, 0.75);
imshow(mapa); %redimensiona (e interpola si hace falta)


%puntos del mapa (nodos)
p(1:10,:)     = [361 233;386 223;321 247;354 268;393 254;394 282;440 270;424 296;450 258;462 236];
p(11:20,:)    = [480 195;490 173;496 139;460 178;461 156;471 124;444 119;408 102;406 128;392 134];
```

```
p(21:30,:)    = [381 199;431 139;440 161;408 171;348 140;309 186;347 117;280 115;326
57;282  64];
p(31:40,:)    = [289   3;228  59;225  92;281  94;231 115;166 115;242 143;251 171;225
205;241 204];
p(41:50,:)    = [271 212;272 189;288 201;276 154;328 206;339 162;308 222;355 222;339
285;318 320];
p(51:60,:)    = [358 292;395 298;353 329;402 333;338 367;299 355;422 465;264 404;170
354;119 246];
p(61:70,:)    = [222 360;201 344;215 336;238 352;275 303;286 327;269 264;294 307;314
294;299 256];
p(71:80,:)    = [244 238;204 258;439 447;473 438;419 404;411 379;406 359;459 374;428
376;500 363];
p(81:90,:)    = [422 352;417 325;445 318;455 314;485 275;461 339;448 342;500 327;500
281;498 258];
p(91:100,:)   = [502 226;570 201;577 175;628 183;597 194;533 155;533 115;594 113;618
96;640  83];
p(101:110,:) = [634 105;557  71;493  97;492  51;458  49;431  56;428  43;451  37;449
20;390  40];
p(111:120,:) = [512   6;581 232;524 277;589 251;531 290;596 263;541 307;603 279;559
328;500 388];
p(121:130,:) = [573 344;503 432;544 419;509 468;547 453;591 436;624 421;545 402;607
389;591 369];
p(131:140,:) = [574 385;579 404;610 296;620 316;639 354;650 377;662 401;674 425;700
466;635 445];
p(141:150,:) = [696 382;726 365;723 426;739 398;770 466;710 402;681 358;667 336;689
325;706 344];
p(151:160,:) = [721 335;607 240;623 231;668 284;700 277;723 273;612 216;561  60;574
30;579   3];
p(161:170,:) = [604  71;611  32;643   3;732   4;792 125;655 112;704 133;783 185;699
186;699 206];
p(171:180,:) = [629 213;650 208;654 231;698 224;839 285;769 374;841 389;761 342;825
265;810 245];
p(181:192,:) = [735 258;745 221;747 203;775 222;169  71; 26  68; 23 113; 37   6; 11
236;174 465;349 442;476 465];

%leemos los valores finales que hemos conseguido con el tetraedro y se encuentran en
%un fichero Excel
D(1:192,1:192) = xlsread('E:\TFG\supuesto_final\matriz_seguridad','Hoja1','B2:GK193');

%pintamos degradado
hold on
for i = 1:192
```

```
        for j = 1:i
            if D(i,j)<1.1
                 if D(i,j)<0.5
                     a = 1-2*D(i,j);
                     b = D(i,j);
                     c = 2*D(i,j);
                 else
                     a = 0;
                     b = D(i,j);
                     c = 2-2*D(i,j);
                 end
                 plot([p(i,1),p(j,1)],[p(i,2),p(j,2)],'color',[a b c],'linewidth',4);
                end
            end
   end
end
```

Appendix C - Archivo .m para generación de arañas con la interacción del usuario

A continuación el archivo .m generado para conseguir un programa en el que el usuario interactúe eligiendo si quiere una araña u otra (o si prefiere pintar todo el mapa), y los pesos asignados a la valoración de los padres, de los alumnos de quinto, y de los alumnos de sexto. Obteniendo en función de estos datos introducidos por el usuario una araña en la que se utiliza el degradado entre los colores verde, azul y rojo para marcar su grado de seguridad.

```
function varargout = CSC(varargin)

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                   'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                   'gui_OpeningFcn', @CSC_OpeningFcn, ...
                   'gui_OutputFcn',  @CSC_OutputFcn, ...
                   'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                   'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
```

```
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before CSC is made visible.
function CSC_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% Choose default command line output for CSC
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% UIWAIT makes CSC wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

%abrimos la imagen
imagen= im2double(imread('E:\TFG\leer_puntos\mapa.png'));
imshow(imagen);
mapa = imresize(imagen, 0.75);
imshow(mapa); %redimensiona (e interpola si hace falta) muy bien

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = CSC_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)  %boton SALIR
close(gcbf)

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)   %boton INICIAR

%puntos
p(1:10,:)     = [361 233;386 223;321 247;354 268;393 254;394 282;440 270;424 296;450
258;462 236];
p(11:20,:)    = [480 195;490 173;496 139;460 178;461 156;471 124;444 119;408 102;406
128;392 134];
```

```
p(21:30,:)   = [381 199;431 139;440 161;408 171;348 140;309 186;347 117;280 115;326 57;282  64];
p(31:40,:)   = [289   3;228  59;225  92;281  94;231 115;166 115;242 143;251 171;225 205;241 204];
p(41:50,:)   = [271 212;272 189;288 201;276 154;328 206;339 162;308 222;355 222;339 285;318 320];
p(51:60,:)   = [358 292;395 298;353 329;402 333;338 367;299 355;422 465;264 404;170 354;119 246];
p(61:70,:)   = [222 360;201 344;215 336;238 352;275 303;286 327;269 264;294 307;314 294;299 256];
p(71:80,:)   = [244 238;204 258;439 447;473 438;419 404;411 379;406 359;459 374;428 376;500 363];
p(81:90,:)   = [422 352;417 325;445 318;455 314;485 275;461 339;448 342;500 327;500 281;498 258];
p(91:100,:)  = [502 226;570 201;577 175;628 183;597 194;533 155;533 115;594 113;618 96;640  83];
p(101:110,:) = [634 105;557  71;493  97;492  51;458  49;431  56;428  43;451  37;449 20;390  40];
p(111:120,:) = [512   6;581 232;524 277;589 251;531 290;596 263;541 307;603 279;559 328;500 388];
p(121:130,:) = [573 344;503 432;544 419;509 468;547 453;591 436;624 421;545 402;607 389;591 369];
p(131:140,:) = [574 385;579 404;610 296;620 316;639 354;650 377;662 401;674 425;700 466;635 445];
p(141:150,:) = [696 382;726 365;723 426;739 398;770 466;710 402;681 358;667 336;689 325;706 344];
p(151:160,:) = [721 335;607 240;623 231;668 284;700 277;723 273;612 216;561  60;574 30;579   3];
p(161:170,:) = [604  71;611  32;643   3;732   4;792 125;655 112;704 133;783 185;699 186;699 206];
p(171:180,:) = [629 213;650 208;654 231;698 224;839 285;769 374;841 389;761 342;825 265;810 245];
p(181:192,:) = [735 258;745 221;747 203;775 222;169  71; 26  68; 23 113; 37   6; 11 236;174 465;349 442;476 465];

%vectores de los sujetos
general(1:192,1:192) = xlsread('E:\TFG\supuesto_final\matriz_seguridad','Hoja1','B2:GK193');
padres(1:192,1:192) = xlsread('E:\TFG\supuesto_final\matriz_seguridad','Hoja2','B2:GK193');
quinto(1:192,1:192) = xlsread('E:\TFG\supuesto_final\matriz_seguridad','Hoja3','B2:GK193');
```

```
sexto(1:192,1:192)                                                                         =
xlsread('E:\TFG\supuesto_final\matriz_seguridad','Hoja4','B2:GK193');

%pesos asignados
vp = handles.edit1;
vq = handles.edit2;
vs = handles.edit3;

%ponderación final
for i = 1:192
    for j = 1:192
        D(i,j) = vp*padres(i,j)+vq*quinto(i,j)+vs*sexto(i,j);
    end
end

if (handles.edit4 == 0)
    %pintar araña entera
    %pintamos degradado
    hold on
    for i = 1:192
        for j = 1:i
            if D(i,j)<1.1
               if D(i,j)<0.5
                   a = 1-2*D(i,j);
                   b = D(i,j);
                   c = 2*D(i,j);
               else
                   a = 0;
                   b = D(i,j);
                   c = 2-2*D(i,j);
               end
            plot([p(i,1),p(j,1)],[p(i,2),p(j,2)],'color',[a b c],'linewidth',4);
            end
        end
    end
else
    if (handles.edit4 == 1)
        destinos = [31;104;100;184;127;191;60];
    elseif (handles.edit4 == 2)
        destinos = [31;110;111;16;102;157;129;90;7;86;192;76;55;61;67;72;37;34]
    elseif (handles.edit4 == 3)
        destinos = [1;2;3]
```

```
    end

    n = length(destinos);

    %transformamos las seguridades en riesgos
    for i=1:192
        for j =1:192
            if D(i,j) < 500
                A(i,j) = 1 - D(i,j);
            else
                A(i,j) = D(i,j);
            end
        end
    end

    [pred] = Dijkstra(A);
    [caminos] = red(pred,destinos);

    %pintamos en degradado
    hold on
    for i = 1 : n
        [camino] = red(pred, destinos(i));
        camino = camino(camino>0);
        for j = 1:(length(camino) -1)
             if D(camino(j),camino(j+1))<0.5
                 a = 1-2*D(camino(j),camino(j+1));
                 b = D(camino(j),camino(j+1));
                 c = 2*D(camino(j),camino(j+1));
             else
                 a = 0;
                 b = D(camino(j),camino(j+1));
                 c = 2-2*D(camino(j),camino(j+1));
             end

plot([p(camino(j),1),p(camino(j+1),1)],[p(camino(j),2),p(camino(j+1),2)],'color',[a   b
c],'linewidth',4);
        end
    end
end


function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)   %VALORACION PADRES
```

```
pesop = get(hObject,'String');  %almacenar valor ingresado
pesop = str2double(pesop);  %pasamos de string a double
handles.edit1 = pesop;     %almacenar en puntero
guidata(hObject,handles);  %salvar los datos de la aplicacion

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
peso5 = get(hObject,'String');  %almacenar valor ingresado
peso5 = str2double(peso5);  %pasamos de string a double
handles.edit2 = peso5;     %almacenar en puntero
guidata(hObject,handles);  %salvar los datos de la aplicacion

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
peso6 = get(hObject,'String');  %almacenar valor ingresado
peso6 = str2double(peso6);  %pasamos de string a double
handles.edit3 = peso6;     %almacenar en puntero
guidata(hObject,handles);  %salvar los datos de la aplicacion

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end
```

```
function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)  %ELEGIMOS LA ARAÑA QUE QUEREMOS
% hObject    handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit4 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit4 as a double

%abrimos la imagen
imagen= im2double(imread('E:\TFG\leer_puntos\mapa.png'));
imshow(imagen);
mapa = imresize(imagen, 0.75);
imshow(mapa); %redimensiona (e interpola si hace falta) muy bien

ar = get(hObject,'String');  %almacenar valor ingresado
ar = str2double(ar);  %pasamos de string a double
handles.edit4 = ar;     %almacenar en puntero
guidata(hObject,handles);  %salvar los datos de la aplicacion

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

%%FUNCIONES%%%%
function [pred] = Dijkstra(D)
%Paso 1: Inicializacion
%u(1)=0, u(j)=d(1,j) para j=2...n
%P={1} T = V-{1}
%P(j)=1 para j=1..n

[n,m] = size(D);
```

```
T = 1:n;
u = zeros(1,n);
pred = zeros(1,n);

for i = 2:n
    u(i)=D(1,i);
    pred(i)=1;
end

P = zeros(n,1);
pred(1)=1;
P(1)=1;
T(1)=0;

for i = 2:n

    %Paso 2
    %Buscar k perteneciente a T talq u(k)=min(u(j))
    %Hacer P=PuK T==T-k

    [v, k] = min(u);
    for j = 2:n
        if (T(j) ~= 0)
            if (~T(k))
                v = u(j);
                k = j;
            end
            if (u(j) < v)
                v = u(j);
                k = j;
            end
        end
    end

    l = sum(P ~= 0);
    P(l+1) = k;
    T(k) = 0;

    if any(T) == 0
        break
    end
```

```
    %Paso 3
    %Revisión de etiquetas temporales
    %para todo j en T calcular u(j)=min(u(j),u(k)+d(k,j))
    %Si el minimo se alcanza en u(k)+d(k,j) entonces p(j)=k
    %ir a paso 2

    aux = D(k,:);
    for j = 2:n
        if (T(j) ~= 0)
            %if u(k)+D(k,j) < u(j)
            if u(k)+ aux(j) < u(j)
                %u(j) = u(k)+ D(k,j);
                u(j) = u(k) + aux(j);
                pred(j)=k;
            end

        end
    end
end

function [caminos] = red(pred,destinos)

n = length(destinos);

for i = 1 : n

    d = destinos(i);
    cont = 1;
    caminos(i , cont) = d;

    while d ~= 1
        caminos(i, cont + 1) = pred(d);
        d = pred(d);
        cont = cont + 1;
    end
    caminos(i,:)=caminos(i,end:-1:1);
end
```